

Workshop for Neutrino Programs with Facilities in Japan 報告

KEK 素粒子原子核研究所

中平 武

nakadair@neutrino.kek.jp

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

池田 一得

motoyasu@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp

京都大学 大学院理学研究科

市川 温子

ichikawa@scphys.kyoto-u.ac.jp

早戸 良成

hayato@icrr.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院理学系研究科

横山 将志

masashi@phys.s.u-tokyo.ac.jp

2015 年 (平成 27 年) 8 月 31 日

1 ワークショップ開催の経緯

ニュートリノ振動の研究は過去 20 年の間に著しい進展をとげ、いまや素粒子物理のメインストリームのひとつとなった。この間、スーパーカミオカンデ (SK) による発見にはじまり、日本の実験が数々の成果をあげ世界をリードし続けてきたことは疑いない。近年では、T2K 実験による電子ニュートリノ出現の発見により、レプトンセクターでの CP 対称性の破れや質量階層性 (m_1, m_2 と m_3 のどちらが大きい) の決定という次の大きな目標に向けた新時代への扉が開かれた。これらの成功をもとに、今後も日本で行われる実験がニュートリノ研究をリードすることが世界中から期待されており、たとえば ICFA (International Committee for Future Accelerators) に設置されたニュートリノパネルでも、日本のハイパーカミオカンデ (HK) が米国の DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) とともに世界の将来計画の柱のひとつとして位置づけられている [1]。

しかしながら、ハイパーカミオカンデがスタートするのは早くても 2025 年頃と想定されており、それまでに現行の計画でどのような物理を達成し、かつ並行してどのように J-PARC 加速器およびビームラインの大強度化、系統誤差の削減、新たな検出器技術の開発などの準備を進めていくのか、コミュニティとして戦略が必要となっている。そのために、これまで各実験コラボレーションの中で検討されてきたそれぞれの将来計画について、既存の実験の枠を超え、グローバルな観点から議論する必要があるとの認識が高まった。そこで、まず出発点とし

て、各実験や研究者が将来計画に対しどのようなアイデアを持っているのか、自由に議論することを目的として研究会を開くこととなった。なお、今回は議論の対象を、J-PARC に関連した実験 (長基線実験の後置検出器でもある SK/HK を含む) に限ることとした。

こうして、2015 年 8 月 4-6 日の 3 日間、リモートでの講演者も含め 10 カ国から 70 名以上の参加者を集め表記の研究会が開催された。各セッションの最後、および各日の最後には、開催趣旨に基づき参加者による活発な意見交換を促すため議論の時間が用意された。本稿では、各セッションの内容について、おおむねプログラムの順番に紹介する。詳細なプログラムと発表資料は会議の Web ページ [2] で公開されているのでそちらを参照していただきたい。

2 第 1 日

初日は本研究会の世話人代表である中家剛氏 (京都大学) による開会挨拶で始まり、前川展祐氏 (名古屋大学) による理論の講演に引き続いて、J-PARC, T2K, SK に関するセッションがあった。

2.1 J-PARC 加速器とそれを用いたニュートリノビーム生成の中長期的な展望

加速器ニュートリノ実験の中長期的な展望を議論する上での最大のポイントは「どのくらいのニュートリノビームが供給されるのか」という点である。まず、そのベースとなる大強度陽子加速器の性能向上の見通しが議論された。

はじめに、齊藤直人氏 (J-PARC センター長) より、最近の J-PARC の稼働状況および J-PARC の各施設の将来構想について説明があり、くわえて小関忠氏 (J-PARC 副センター長) より J-PARC 加速器の最近の進展と性能向上への取り組みが説明された。

現在の計画では、J-PARC メインリング (MR) の主電磁石電源の更新などにより、ビーム周期を現状の 2.48 秒から 1.3 秒に短縮することで、設計ビーム強度 750 kW の実現がはかられている。それに加えて、MR 主電磁石電源の更新には、新しいベータトロンチェーンでのビーム運転を可能にするという狙いもある。新しい動作点ではバンチあたりの陽子数を増強できることも期待できるので、設計強度を大きく超える 1.3 MW 程度までのビーム強度も視野に入ってくる。また、それに対応する 1 MW 級の陽子ビームを受け入れるためのニュートリノビームラインの性能向上にむけた課題も議論された。

さらに小林隆氏 (J-PARC) から、「年間のニュートリノビーム運転期間は約 5 ヶ月」という作業仮説に基づいた積算陽子ビーム供給量の“目標値”が示された。2020 年頃までに現行 T2K 実験 (J-PARC E11) に認められた 7.8×10^{21} POT (protons-on-target) が供給され、今から約 10 年 (2026 年前後) で約 2×10^{22} POT に到達すると期待される。

参加者からの関心が高かったのは、J-PARC-MR の性能向上の鍵となる電磁石電源の更新の見通しと、ビームタイム (加速器運転期間) 確保の見通しであった。とくに後者に関しては、COMET 実験をはじめとする J-PARC ハドロ実験施設での実験の進展に伴って、近い将来に切実な問題となることが予想されることから、J-PARC で速い取り出しと遅い取り出しが同時に稼働できるようにアップグレードできないのか、という質問が多かった。

2.2 Post T2K についての議論

T2K 実験は現在までに、目標の 14% の統計を貯めている。2013 年までに得られたミューオン・ニュートリノから電子ニュートリノが出現する事象の数は CP の破れない場合の予測値よりも若干多く、統計的に有意ではないが CP の破れの効果が見え始めている可能性がある。目標の統計まで貯めると、CP が最大限に破れている (CP 位相が $\pm 90^\circ$) 場合には、質量階層性にもよるが CP の破れに対して 90% から 99% の信頼度の感度を持つ。この信頼度でも CP の破れが測定されればエキサイティングであるが、はっきりとした結論を出すには 3σ 以上の信頼度が望まれる。ハイパーカミオカンデは、CP 位相の広い領域で CP の破れに対して 3σ 以上の感度を持つが、その実現までには長期の建設と、そして J-PARC のビーム増強が必要である。J-PARC のビームを速やかに増強しつつ、また一刻も早く CP の破れに迫るため、T2K の目標統計を 3 倍にする議論が始まりつつ

ある。この会議では、加速器増強に加えて、実験グループ側として何ができるのか、何をしなければいけないのかについて議論が交わされた。

まず、トップダウン的に、“post T2K” (名前はまだ決まっていない) で、CP が最大限に破れている場合に CP の破れに対して少なくとも 3σ 以上、場合によっては 4σ 以上の感度を持つためには、同じ陽子ビーム数に対して統計を 1.5 倍、また系統誤差を現状の約 10% から 2~3% に低減することが望まれるというお題が提示され、それを実現するためにどうすればよいのかについて各発表者が考えを示した。ビームラインとしては、1.3 MW の陽子ビームを受け入れるためには冷却能力の増強が必要であるが技術的には可能であろう、パイ粒子収束用のホーン電流を電源等の増強によって現状の 250 kA から元々の設計値の 320 kA に上げることでニュートリノビームの強度を 10% 程度増やせるだろうとの見通しであった。スーパーカミオカンデ (SK) の解析では、現在、電子ニュートリノ事象選択の効率が 66% であることを、カット (崩壊電子がある事象) を一つ減らすことで純度はあまり下げずに効率を 13% 向上できそうである、そのほかにも事象の再構成の改良で約 20% 程度の向上が見込めるということであった。さらに長年、難攻不落と考えられてきた“壁から 2 メートル”カットを緩めて有効体積を 10-15% 増やすという野望も紹介された。

系統誤差については、ニュートリノビームの不定性、ニュートリノ原子核反応の不定性、SK 検出器の系統誤差について、各発表者から現状のまとめと改善のアイデアが示されたが、2-3% の系統誤差を実現する目途が立った訳ではなく、これからやることがまだまだ多そうである。ポスト T2K にむけて、まずは早急に LOI をまとめる必要があるとの意見で一致した。

2.3 Super-Kamiokande 将来計画

本セッションでは、現在のスーパーカミオカンデの性能を大きく向上させるための計画についての発表が行われた。

まず、2015 年 6 月に SK 実験が基本方針を承認した、ガドリニウム導入計画について報告された。本計画では、SK の純水中に 0.2% の硫酸ガドリニウムを加え、ガドリニウムの中性子捕獲信号を捉えることで反ニュートリノを遅延同時計測することを可能とする。主な物理目標は、超新星背景ニュートリノ (これまでの超新星爆発で放出されて宇宙を漂っているニュートリノ) の発見である。発表では、ガドリニウム導入後も水質に大きな変化はないというテスト実験の結果や、陽子崩壊等の他の物理に対するニュートリノ・反ニュートリノ識別による感度の向上等も議論された。今後は、T2K 実験とも予定の調整を行ないながら本計画の実現に向けた作業を行なう予定となっている。

また、既存のスーパーカミオカンデの光電子増倍管の位置を移設、外水層の厚さを削減することで、有効体積を現在の1.5倍から2倍に拡張、さらに、既設の光電子増倍管の隙間に小型の光電子増倍管を増設することで、検出器性能も高めるというアイデアが示された。また、水をベースとしたシンチレータを用いて発光量を増やし、低エネルギーの物理事象の感度を増加させる可能性についても発表が行われた。

来年で観測開始20年を迎えるSK検出器だが、今後検出器の改良を加えることで、観測能力を大きく向上できることが期待される内容であった。

3 2日目

3.1 国外での関連実験

このセッションでは、末包文彦氏（東北大）による、日本のT2K/HK実験と、国外のより基線の長い実験の相補性を再確認する講演のあと、日本国外での実験についての紹介があった。

米国の長基線ニュートリノ振動実験NO ν AはT2Kと同様に電子ニュートリノ出現によるCP非対称性の探索を目指すほか、810kmの基線長により質量階層性に感度がある。2014年秋に液体シンチレータを用いた14ktonのFar Detectorが完成し、データ収集と解析が進んでいる様子が報告された¹。2016年までには現在の2-3倍のデータをためる予定とのことで、今後とも要注目である。

南極のIceCubeにPMTを追加して数GeVまでの低エネルギー事象をターゲットにするPINGU、地中海にPMTアレイを沈めるORCA、インドで計画中の50ktonの鉄を標的としたINO-ICAL検出器、の各実験は、大気ニュートリノの観測による質量階層性の決定を主な物理目標のひとつとしており、今後5年ほどでの実験開始を目指している。

原子炉実験のレビューでは、現行の実験による θ_{13} の精密測定の見通しに加え、原子炉から約53kmのところに20ktonの液体シンチレータ検出器を建設し、質量階層性の決定と振動パラメータの精密測定を目指す中国のJUNO実験の紹介があった。JUNOはすでに予算が承認され、2015年1月から施設の建設が始まっており、2020年の実験開始を目指している。また、韓国でも同様のRENO-50という計画があり、予算の承認を待っている状況である。

最後に、米国のDUNE実験についての講演があった。Fermilabの加速器からの陽子ビームの強度を1.2MWまでアップグレードし、新たに建設するニュートリノビームラインと40ktonの液体アルゴンTPC検出器を用いて1300kmの長基線ニュートリノ実験を行うほか、陽子

崩壊の探索や超新星ニュートリノの検出も目標とする。ハイパーカミオカンデ計画とは検出器技術、ビームエネルギーや基線長が異なり、相補的な役割を果たす。2017年には施設の建設を始め、2024年に最初の10ktonの検出器で実験を開始するという野心的な計画である。

近年の電子ニュートリノ出現の発見と θ_{13} の決定をうけて、様々な実験計画が実現に向かっていることがわかる。特に、質量階層性の決定に関しては複数の実験が計画されており、またSKなど現行の実験からも情報が得られるため、2020年代前半までには確実な結果が得られるのではないかと期待できる状況である。

3.2 J-PARCでの実験計画

J-PARCは、米国Fermilabと並んで現在世界でふたつしかない大強度の加速器ニュートリノ施設である。このセッションでは、そのポテンシャルをより活用すべく提案されている、さまざまな実験や測定器開発に関する議論を行った。

T2Kで採用されたオフ軸スビーム法は、ビームの中心方向からの角度とニュートリノのエネルギーに相関があることを利用している。NuPRISM (J-PARC P61) は、標的から1-2kmの距離にオフ軸角 $1^\circ \sim 4^\circ$ をカバーする縦長の水チェレンコフ検出器を置く提案である。さまざまな角度での測定を組み合わせることで、ニュートリノ反応のエネルギー依存性を測ることができる。ニュートリノ振動測定の系統誤差を削減できる可能性があるほか、ニュートリノ反応の研究やステライルニュートリノの探索でもユニークな測定ができること期待される。

OPERA実験でも使われた原子核乾板の特徴を生かし、J-PARCでニュートリノ反応の詳細な測定や、ステライルニュートリノの探索などを目的とした実験を行う提案の最初のステップとして、テスト実験T60が行われている。すでにニュートリノ反応事象が観測されており、今後の進展が期待される。

液体アルゴンTPCの国内での開発については、大型検出器実現のための基幹技術として、読み出し回路の開発や小型の検出器を使ったR&Dを行っている現状が紹介された。

LSND実験などによりeV付近の質量をもつステライルニュートリノの存在の可能性が報告されているが、決定的な実験結果はなく、長年混乱した状況が続いている。MLFでの3GeV陽子ビームによる静止 π からのニュートリノを用いるJSNS²実験 (J-PARC E56) は、LSND実験と同じ原理でありながら、パルスビームによる時間構造の利用と検出器の改良によりS/N比を大幅に改善し、LSNDの結果を“without any excuses”で検証することを目指している。昨年J-PARC PACからStage 1 approvalを得て、実現に向けて開発が進んでいる。

¹実はこの2日後に最初の結果の報告があり [3]、ぎりぎりのところでタイミングを逃したのは残念であった。

同じく MLF を使ったステライルニュートリノ探索の実験として、静止 K 中間子からの単色エネルギーのニュートリノを 120 m という長さの検出器で観測し、 ν_μ 消失の振動パターンをとらえる“Kpipe”という提案の紹介があった。

これらの提案は、アイデアだけのものから実現に向けて粛々と進んでいるものまで、計画の段階は様々であるが、ユニークな提案が多く、J-PARC のニュートリノ実験施設としての可能性と、分野の研究者の活発さを示すものだといえる。

4 3 日目

4.1 前置検出器アップグレード

今後、T2K や HK でニュートリノ振動の精密測定を行うにあたり、ニュートリノ反応の不定性に起因する系統誤差を抑えるために前置検出器の役割が今にも増して重要となる。T2K 実験では数年前から前置検出器のアップグレードの可能性について議論を重ねてきており、また一方ハイパーカミオカンデ計画の中でも必要な前置検出器の性能や設計について検討を行ってきた。しかし、ほぼ同じセットアップの実験であり、施設や人員の重複を考へても連続的なものになることが自然であるため、特に実験グループを超えた議論が必要な領域のひとつである。

本会議では、現在の T2K の前置検出器の性能と今後必要となる改善についての見通しについて議論したのち、現存の前置検出器のアップグレードと、1-2km の距離に新しく中間検出器を置く可能性についての議論を行った。今後、“post T2K” や HK 計画の進展に伴い、将来の前置検出器に関する議論はますます活発になると思われる。

4.2 Hyper-Kamiokande

新たな空洞を掘削し、総体積 1 メガトンの水チェレンコフ型検出器を建設して実験を行おうとするハイパーカミオカンデ計画に関連する一連の発表が行われた。検出器や計画についての概要が説明され、実際の空洞建設について、地質調査結果や可能な空洞形状などの検討状況が報告された。その後、検出器に必要な要素技術について、コラボレーションに参加している世界各国の大学や研究機関が行う研究開発の現状が報告され、検出器の建設に向けた準備が着実に進んでいることを印象づけた。

ハイパーカミオカンデにおいて行われる物理についても複数の発表が行なわれた。まず、J-PARC からのニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験による物理の検出感度について報告された。現在最も関心が集まるレプトンセクターの CP の非保存の探索については、現実的な不定性を考慮に入れた解析で

も、10 年程度のデータを用いれば、パラメータ δ_{CP} がとりうる範囲のうち、76% の領域を 3σ で調べることができ、58% の領域を 5σ で調べることができると示された。また、大気ニュートリノのデータを用いれば、幅広い L/E の領域について振動現象をしらべることができ、やはり 10 年の観測でニュートリノの質量階層性についても 3σ 以上の感度を持つと期待されることが示された。さらに加速器ニュートリノのデータを組み合わせることで、CP 非保存についてもさらに感度が向上することも示された。太陽ニュートリノの観測においては、これまでの実験では統計不足だった地球内部での物質効果による太陽ニュートリノの振動現象を検証することが可能になると期待される。また、遠方で発生した超新星爆発ニュートリノの観測感度、過去に発生した残存超新星ニュートリノの観測感度の向上も期待されることが示された。ニュートリノ観測以外に、大統一理論で予言される陽子崩壊現象についても、主な崩壊モードでこれまでよりも一桁以上高い感度をもつことなど、興味深い物理トピックが多数あることを印象づける発表となった。

5 ロードマップに向けて

最終日の午後には、Kavli IPMU の村山機構長の講演に続いて、村山氏や徳宿素核研所長、外国からの参加者らによるパネルディスカッション、および参加者全員によるオープンディスカッションを行った。この研究会のような議論の場をもつこと、それに基づき中長期のロードマップをもつことの重要性を指摘する意見や、ニュートリノ物理の将来に J-PARC のビームパワー増強が決定的に重要であるとの意見、さらには現行計画から将来の計画へどのようにして連続的につなげるべきかについてなどの意見が交換された。

今後は、今回の研究会のまとめをもとにさらに議論を深めていき、世話人・コンビナーやプログラム委員会のメンバーを中心に、年内をめどにロードマップをまとめることを目指している。意見のある方、興味のある方は、議論への参加を歓迎するので、ぜひ世話人（研究会の Web ページ [2] を参照）までご連絡いただきたい。

参考文献

- [1] J. Cao *et al.*, “Initial report from the ICFA Neutrino Panel,” arXiv:1405.7052; “On the complementarity of Hyper-K and LBNF,” arXiv:1501.03918.
- [2] http://www-conf.kek.jp/ws_nu_prog_in_jp/
<https://kds.kek.jp/indico/event/19079/>
- [3] http://theory.fnal.gov/jetp/talks/20150806_nova_docdb.pdf